Concours Communs Marocain - Session 2009

Corrigé de l'épreuve d'algèbre

Polynôme d'interpolation de Lagrange. Approximation au sens de moindres carrées

Corrigé par M.TARQI

1ère Partie : Étude de l'application f_m

1. R étant un polynôme de degré inférieure ou égal à n, admettant $n+1$ racines distintes, donc R est le polynôme nul.
2. Soient $P, Q \in \mathcal{P}_m$ et $\lambda \in \mathbb{R}$, alors on a :

$$\begin{aligned} f_m(P+\lambda Q) &= ((P+\lambda Q)(x_0), ..., (P+\lambda Q)(x_n)) \\ &= (P(x_0), ..., P(x_n)) + \lambda(Q(x_0), ..., Q(x_n)) \\ &= f_m(P) + \lambda f_m(Q) \end{aligned}$$

   Donc f_m est une application linéaire.

3. (a) Il est clair que $\{Q\pi / Q \in \mathcal{P}_{m-n-1}\} \subset \ker f_m$, puisque $Q\pi \in \mathcal{P}_m$ et $f_m(Q\pi) = 0$. D'autre part, si $P \in \ker f_m$, alors $x_0, x_1, ..., x_n$ seront des racines de P, donc il est divisible par π. Ainsi $\ker f = \{Q\pi / Q \in \mathcal{P}_{m-n-1}\}$.

   (b) Soit $P \in \mathcal{P}_m$, alors il existe un couple unique (Q, R) de polynômes tels que $P = Q\pi + R$, avec $R = 0$ ou $\deg R \leq n$, et comme $Q\pi \in \ker f_m$ et $R \in \mathcal{P}_m$, alors

$$\mathcal{P}_m = \ker f_m \oplus \mathcal{P}_n.$$

   (c) D'après la dérnière question, $\dim \ker f_m = m - n$. La famille $\{\pi, X\pi, ..., X^{m-n-1}\pi\}$ est une base de $\ker f_m$.

   (d) Toujours d'après la question (b) de cette partie, $\mathrm{rg}\, f_m = n+1$, donc f_m est surjective puisque $\dim \mathbb{R}^{n+1} = n+1$.

4. (a) Si $P \in \mathcal{P}_m$ tel que $f_m(P) = 0$, alors le polynôme P aura $n+1$ racines distinctes et comme $m \leq n$, alors $P = 0$ et donc f_m est injective.

   (b) $\mathrm{rg}\, f_m = \dim \mathcal{P}_m = m+1$.

   (c) f_m est surjective si et seulement si $\dim \mathcal{P}_m = \dim \mathbb{R}^{n+1}$, c'est-à-dire $m = n$.

5. (a) L'application

$$\begin{aligned} f_m : \ \mathcal{P}_n &\longrightarrow \mathbb{R}^{n+1} \\ P &\longmapsto (P(x_0), ..., P(x_n)) \end{aligned}$$

   étant bijective ($m = n$), donc pour tout élément $y = (y_0, y_1 ..., y_n) \in \mathbb{R}^{n+1}$, il existe un seul polynôme $P_y \in \mathcal{P}_n$ tel que $f_n(P_y) = (y_0, y_1, ..., y_n)$.

   (b) i. D'après la définition des L_i, on a $L_i(x_i) = 1$ et $L_i(x_j) = 0$ si $i \neq j$.

   ii. La famille $(L_1, L_2, ..., L_n)$ est une base de $\mathcal{P}_n$, comme image réciproque de la base canonique de $\mathbb{R}^{n+1}$, par l'isomorphisme f_n.

   (c) Posons

$$(y_0, y_1, ..., y_n) = \sum_{i=0}^{n} y_i \varepsilon_i$$

On aura alors,
$$P_y=\sum_{i=1}^{p} y_i f_n^{-1}(\varepsilon_i)=\sum_{i=1}^{p} y_i L_i.$$
Soit $P=\sum_{i=0}^{n} L_i$, alors $P(x_i)=1$ pour tout $0\leq i\leq n$, donc d'après la question 1. de cette partie $P=1$, d'où :
$$\sum_{i=0}^{n} L_i=1.$$

2ème partie : Problème aux moindres carrées

1. (a) Soit $y\in \operatorname{Im} A$, alors il existe $x\in\mathcal{M}_{p,1}$ tel que $y=Ax$. Donc
$$<b-Au,y>_p=<b-Au,Ax>_p={}^t x^tA(b-Au)=0,$$
ainsi $b-Au$ est orthogonal à $\operatorname{Im} A$.
Comme les vecteurs $b-Au$ et Ax sont orthogonaux, alors d'après Pythagore, $\|b-Ax\|=\|b-Au\|+\|A(u-x)\|\geq\|b-Au\|$ et d'après la caractérisation de la projection $Au=P_{\operatorname{Im} A}(b)$.
   (b) On a, pour tout $x\in\mathcal{M}_{q,1}$ $\|b-Au\|\leq\|b-Ax\|+\|Ax-Au\|\leq\|b-Ax\|$, donc
$$\|b-Au\|=\min\{\|b-Ax\|_p/x\in\mathcal{M}_{q,1}(\mathbb{R})\}$$
ce minimum est atteint pour tout vecteur $x\in\mathcal{M}_{q,1}(\mathbb{R})$ tel que $Ax=Au$.
2. On sait, d'après la question 1.(a) de cette partie, que $b-Au$ est orthogonal à $\operatorname{Im}(A)$, c'est-à-dire $\forall x\in\mathcal{M}_{q,1}(\mathbb{R})<b-Au,Ax>={}^t x^tA(b-Au)=<x,{}^tAb-{}^tAAu>=0$, donc le vecteur ${}^tAAu-{}^tAb$ est orthogonal à tous x de $\mathcal{M}_{p,1}(\mathbb{R})$, en particulier il est orthogonal à il même , c'est-à-dire $\|{}^tAAu-{}^tAb\|=0$, ainsi ${}^tAAu={}^tAb$.
3. (a) Si $x\in\ker{}^tAA$, alors $<Ax,Ax>_p={}^tx^tAAx=0$.
   (b) Il est clair que $\ker A\subset\ker{}^tAA$ et d'après la question précédente, si $x\in\ker{}^tAA$, alors $\|Ax\|_p^2=0$, donc $Ax=0$ et par suite $x\in\ker A$, d'où l'égalité.
   (c) $\operatorname{rg}({}^tA)=\operatorname{rg}(A)=p-\dim\ker(A)=p-\dim\ker({}^tAA)=\operatorname{rg}({}^tAA)$.
   (d) Soit $y\in\operatorname{Im}{}^tAA$, donc il existe $x\in\mathcal{M}_{p,1}(\mathbb{R})$ tel que $y={}^tAAx$, c'est-à-dire $y\in\operatorname{Im}{}^tA$, d'où l'inclusion demandée. Les deux assertions $\operatorname{rg}({}^tA)=\operatorname{rg}({}^tAA)$ et $\operatorname{Im}{}^tAA\subset\operatorname{Im}{}^tA$ entraînent $\operatorname{Im}{}^tA=\operatorname{Im}{}^tAA$.
4. (a) D'après l'étude précédente, le problème aux moindres carrés admet une solution si et seulement si il existe $u\in\mathcal{M}_{q,1}(\mathbb{R})$ tel que ${}^tAAu={}^tAb$ c'est-à-dire le système ${}^tAAu={}^tAb$ admet des solutions, ce qui est toujours possible, d'après la question 3.(c).
   (b) Supposons $\ker A=\{0\}$ et soit u et v de tels ${}^tAAu={}^tAb$ et ${}^tAAv={}^tAb$, alors $u-v\in\ker{}^tAA=\ker{}^tA=\{0\}$, donc $v=u$ et par conséquent le poblème admet une solution unique.

3ème Partie : Approximation polynomiale au sens des moindres carrées

A. Étude dans le cas $m\geq n+1$

1. On sait qu'il existe un unique polynôme $Q_0 \in \mathcal{P}_n$ tel que $f_n(Q_0) = (y_0, y_1, ..., y_n)$, c'est le polynôme $\sum\limits_{i=0}^{n} y_i L_i$ défini dans la première partie. D'autre part $\mathcal{P}_n \subset \mathcal{P}_m$ et la restriction de f_m à $\mathcal{P}_n$ n'est autre que f_n, alors on aura nécessairement

$$f_m(Q_0) = (y_0, y_1, ..., y_n).$$

2. On a $Q_0 \in \mathcal{P}_m$ et $\phi_m(Q_0) = 0$, donc $\lambda_m = 0$. D'autre part $\phi_m(P) = 0$ si et seulement si $P(x_i) = y_i$ pour tout entier i tel que $0 \leq i \leq n$, donc l'ensemble des polynômes de $\mathcal{P}_m$ où le minimum est atteint est donc $\{P \in \mathcal{P}_m / f_m(P) = (y_0, y_1, ..., y_n)\}$

B. Étude dans le cas $m \leq n$

1. (a) ${}^tAA$ est une matrice carée d'ordre $m+1$ et son coefficient d'indice (i,j) est donné par :

$$\sum_{k=0}^{n} x_k^i x_k^j.$$

   (b) On a un sous déteminant maximal non nul d'ordre $m+1$ extrait de A, à savoir

$$\begin{vmatrix} 1 & x_0 & \cdots & x_0^m \\ 1 & x_1 & \cdots & x_1^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_m & \cdots & x_m^m \end{vmatrix} = \prod_{0 \leq j < i \leq m} (x_i - x_j)$$

   donc $\operatorname{rg} A = m+1$.

   (c) On sait que $\operatorname{rg}^t AA = \operatorname{rg}^t A = \operatorname{rg} A = m+1$, donc ${}^tAA$ est inversible.

2. (a) On a évidement

$$AV_p =^t (P(x_0), P(x_1), ..., P(x_n).$$

   (b) On calcule

$$\|b - AV_p\|_{n+1}^2 = \|(y_0 - P(x_0), ..., y_n - P(x_n))\|_{n+1}^2 = \sum_{i=0}^{n} (y_i - P(x_i))^2 = \phi_m(P).$$

3. (a) D'après la partie précédente, on sait qu'il existe, puisque ${}^tAA$ est inversible, un unique vecteur $U = (c_0, c_1, ..., c_m)$ tel que

$$\|b - AU\|_{n+1}^2 = \min\{\|b - AX\|_{n+1}^2 / x \in \mathcal{M}_{m+1,1}(\mathbb{R})\}$$

   donc le polynôme $P_0 = \sum\limits_{k=0}^{m} c_k X^k$ répond à la question.

   (b) D'après la question précédente le vecteur $U = V_{P_0}$ est l'unique solution du système linéaire ${}^tAAZ =^t Ab$.

   (c) $\lambda_m = \Phi_m(P_0)$.

4. **Application**

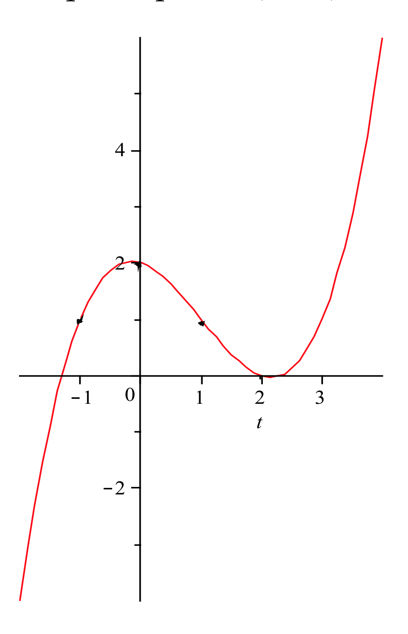
   (a) On trouve $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 8 \end{pmatrix}$ et ${}^tAA = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 6 & 8 \\ 2 & 6 & 8 & 18 \\ 6 & 8 & 18 & 32 \\ 8 & 18 & 32 & 66 \end{pmatrix}$

(b) On a ${}^tAb = \begin{pmatrix} 4 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$

(c) On trouve $U = (2, \dfrac{-1}{3}, -1, \dfrac{1}{3})$.

(d) $P_0(X) = 2 - \dfrac{1}{3}X - X^2 + \dfrac{1}{3}X^3$ et $\lambda_3 = \|b - Au\|_4^2 = 0$.

(e) Le graphe de la fonction $t \longmapsto P_0(t)$ et les quatre points (x_i, y_i).



• • • • • • • • • • • • •

M.Tarqi-Centre Ibn Abdoune des classes préparatoires-Khouribga. Maroc
E-mail : medtarqi@yahoo.fr